

脑机接口技术在脑卒中患者下肢功能康复中的应用前景

曾维昌

北京嘉和美康信息技术有限公司，北京市，100000；

摘要：脑卒中是神经外科常发的疾病之一，具有高发病率、高致残率和高死亡率的特点。下肢功能障碍是脑卒中患者常见的后遗症之一，而脑机接口技术的出现为脑卒中患者下肢功能康复带来了新的希望。该技术可以绕过受损的神经肌肉系统，直接从大脑中提取神经信号，并将其转化为控制指令，驱动外部设备完成特定的动作，这一技术的核心在于能够捕捉大脑的运动意图，并将其转化为实际的运动，为那些因神经损伤而无法控制肢体运动的患者提供了一种新的康复途径。基于此，本文就脑机接口技术在脑卒中患者下肢功能康复中的应用前景进行了分析，以期能够为该技术的普及推广提供科学的参考依据。

关键词：脑机接口技术；侵入式柔性电极；脑卒中；下肢康复

DOI:10.69979/3029-2808.25.06.046

引言

脑卒中导致的下肢功能手段严重影响患者日常生活活动能力和生活质量。但是传统的康复治疗方法，如物理治疗、作业治疗等，虽然在一定程度上能够促进患者下肢功能的恢复，但对于一些严重受损的患者，其效果往往有限。近年来，脑机接口技术取得了显著的进步，政府和相关机构加大了对康复医学领域的投入，为脑机接口技术在脑卒中患者下肢功能康复中的研究和应用，提供了良好的政策环境和社会氛围。

1 脑机接口技术概述

脑机接口技术(Brain-ComputerInterface, BCI)，也被称为大脑-机器接口或脑机交互，是一种在人或动物大脑与外部设备之间建立的直接交流和控制通道的技术。它打破了传统依靠肌肉和神经来实现人体与外界交互的方式，直接从大脑中提取神经信号，并将其转化为可被计算机识别和处理的指令，从而实现对外部设备的控制，为人类与外界的交互带来了全新的模式。

脑机接口技术的工作原理涉及多个复杂的步骤。首先是信号采集阶段，这需要使用专门的传感器来记录大脑活动产生的各种信号，常见的信号类型包括电信号、磁信号和代谢信号等。其中，脑电图(EEG)是最常用的非侵入式信号采集方法，它通过放置在头皮上的电极来记录大脑的电活动。这种方法操作简单、无创，但信号分辨率相对较低，容易受到外界干扰。而侵入式的信号采集方式则需要通过手术将电极植入大脑皮层，能获得高分辨率的神经信号，但具有一定风险性，可能引发

感染、出血等并发症。半侵入式脑机接口的电极穿过颅骨，但不进入大脑皮层，其信号质量介于侵入式和非侵入式之间。采集到的原始大脑信号通常非常微弱且包含大量噪声，因此需要进行信号预处理。这一步骤主要包括滤波、放大、去噪等操作，以提高信号的质量和可靠性。比如，通过滤波去除肌肉活动、心电信号等干扰因素，使后续的分析 and 处理更加准确。接下来是特征提取环节，从预处理后的信号中提取与特定大脑活动或意图相关的特征。在不同的应用场景中，需要提取的特征也有所不同，比如在运动想象任务中，会提取脑电信号的特定频率成分(如 μ 波和 β 波)的变化特征。这些特征能够反映大脑的运动意图，是实现准确控制的关键。然后使用机器学习或深度学习算法对提取的特征进行模式识别与分类，通过大量的数据训练分类器，将大脑信号映射到不同的控制指令。比如，通过训练可以将运动想象信号分类为向左、向右、向前等不同的运动指令，或者识别出不同的认知状态。最后，将分类结果转换为具体的控制指令，发送给外部设备，如假肢、轮椅、计算机等，实现对设备的控制。比如，当患者想象手部的运动时，脑机接口系统可以将相应的信号转化为指令，控制假肢完成抓握、伸展等动作。

2 脑机接口技术在脑卒中患者下肢功能康复中的应用方式

2.1 基于脑电信号的康复系统

该系统主要利用脑电图(EEG)来采集患者大脑的运动意图。EEG是一种非侵入式的脑电信号采集方法，

通过将电极放置在患者头皮上,能够记录大脑神经元活动产生的微弱电信号。在脑卒中患者尝试进行下肢运动时,其大脑相应的运动皮层区域会产生特定的电活动模式,这些模式蕴含着患者的运动意图信息。由于原始的 EEG 信号往往存在诸多问题,如信号微弱、容易受到外界干扰(包括肌肉活动、心电信号等),并且不同患者之间的信号特征可能存在较大差异,为了提高 EEG 信号的质量和可用性,医疗数据治理就显得尤为关键。首先,对采集到的原始 EEG 信号进行预处理,包括滤波操作,通过设置合适的滤波器去除外界干扰因素,增强信号的清晰度;进行放大处理,提升信号强度以便后续分析;以及去噪处理,进一步提高信号的质量。其次,建立大规模的 EEG 信号数据库,收集不同患者在不同康复阶段的 EEG 信号数据。利用先进的数据挖掘和机器学习技术对这些数据进行分析 and 处理,挖掘出其中隐藏的规律和特征。

经过医疗数据治理后的 EEG 信号,能够更准确地反映患者的大脑运动意图。这些高质量的信号可以与脑机接口进行有效对接。脑机接口系统会运用模式识别技术,对治理后的 EEG 信号进行分析和分类。通过提前使用大量的样本数据对分类器进行训练,使其能够识别不同的大脑信号模式,并将这些模式与特定的下肢运动指令进行关联。例如,当患者想象左腿向前迈出时,经过训练的分类器能够准确识别这种信号模式,并将其转化为控制指令。

2.2 与虚拟现实技术结合的康复训练

将脑机接口与虚拟现实技术相结合,能够为患者创造出沉浸式的康复环境。在这种环境中,患者仿佛置身于一个真实的场景中进行康复训练,大大提高了训练的趣味性和吸引力。比如,患者可以在虚拟现实场景中模拟在公园中散步、爬楼梯等日常活动。患者通过脑机接口技术控制自己在虚拟环境中的下肢运动,当患者产生运动意图时,脑机接口系统采集并处理大脑信号,将其转化为指令,控制虚拟角色的下肢动作。同时,虚拟现实环境会根据患者的动作实时反馈相应的视觉、听觉等信息,让患者有身临其境的感觉。这种沉浸式的体验能够有效提高患者的训练积极性,使患者更加主动地参与康复训练。

2.3 侵入式柔性电极的应用

传统电极在脑电信号采集方面存在一定局限性,而侵入式柔性电极凭借其独特优势脱颖而出。它能够穿过颅骨,更接近大脑神经元,从而获取质量更高、分辨率更优的脑电信号。对于脑卒中患者而言,精确捕捉大脑运动皮层发出的微弱信号是实现下肢功能有效康复的基础。侵入式柔性电极可以清晰准确地记录这些信号,为后续的信号处理和模式识别提供可靠的数据支持,使系统能够更精准地解读患者的运动意图。从材料和结构来看,侵入式柔性电极采用了柔软且生物相容性良好的材料,能最大程度减少对脑组织的损伤和免疫反应。这种特性使得它可以在大脑内长期稳定地工作,持续为康复治疗提供有效信号。在实际应用中,它能与先进的康复设备相结合,驱动如康复机器人、外骨骼等设备,为患者的下肢康复训练提供更精确、更个性化的助力。而且,其能够实时、动态地监测大脑神经活动的变化,医生可以根据这些反馈及时调整康复方案,提高康复效果和效率。

2.4 神经反馈训练

在康复过程中,脑机接口系统可以实时监测患者的大脑信号变化,并将这些信息反馈给患者。比如,当患者尝试进行下肢运动时,系统会显示大脑信号的相关参数,如特定频率成分的功率变化等。患者可以根据这些反馈信息,有意识地调整自己的神经活动。通过不断地训练,患者逐渐学会如何更好地控制大脑的神经活动,促进神经可塑性的发展。神经可塑性是指大脑在受到损伤后,具有重新组织和修复神经连接的能力。通过神经反馈训练,患者的大脑能够更好地适应损伤后的变化,重新建立起有效的神经通路,从而改善下肢的运动功能。这种训练方式有助于患者提高自我控制能力,增强康复的信心,为下肢功能的恢复提供了一种新的途径。

3 脑机接口技术在脑卒中患者下肢功能康复中的应用前景

3.1 技术发展趋势

从信号采集方面来看,未来脑机接口技术会朝着更高精度、更便捷、更安全的方向发展。目前使用的脑电图(EEG)虽操作简便,但信号分辨率低、易受干扰;侵入式电极信号质量高却有手术风险。未来,新型传感器的研发将是重点。比如,科学家们可能会开发出具备更高灵敏度和空间分辨率的传感器,它们能够更精准地

捕捉大脑微弱的神经电活动信号。这些传感器或许会采用纳米技术,体积更小且能更紧密地贴合头皮甚至大脑组织,减少外界干扰,提高信号采集的准确性。

模式识别作为脑机接口技术的核心环节,也将迎来巨大的发展。目前的模式识别算法在面对个体差异和复杂环境时,识别准确率还有待提高。未来,深度学习等人工智能技术将在模式识别中发挥更大的作用。通过构建更复杂、更深度的神经网络模型,能够对大脑信号进行更细致的特征提取和分类。比如,利用卷积神经网络(CNN)对大脑信号的时空特征进行深度挖掘,循环神经网络(RNN)处理大脑信号的序列信息,提高对患者运动意图的识别准确率。此外,多模态信息融合的模式识别方法将成为趋势,结合大脑信号与其他生理信号(如肌电信号、心率信号等)以及环境信息,综合判断患者的运动状态和意图,使脑机接口系统的控制更加精准和自然。

3.2 临床应用拓展

对于缺血性脑卒中患者,发病后往往会出现局部脑组织缺血缺氧,导致神经功能受损,影响下肢运动。脑机接口技术可以通过采集大脑运动皮层的信号,检测患者潜在的运动意图,即使患者肢体暂时无法自主运动,也能通过该技术将大脑信号转化为指令,驱动康复设备辅助下肢进行运动训练。这种训练方式有助于促进神经可塑性,激发大脑的自我修复机制,加速神经功能的恢复。而对于出血性脑卒中患者,由于脑部出血对周围脑组织造成压迫和损伤,其康复过程更为复杂。脑机接口技术可以根据患者不同阶段的大脑信号变化,调整康复训练的强度和方式,为患者制定个性化的康复方案。比如,在出血吸收期,采用低强度的训练模式,避免对受损脑组织造成二次伤害;在恢复期,逐渐增加训练强度,提高患者的下肢运动能力。另外,在不同的康复阶段,脑机接口技术也能发挥不同的作用。在早期康复阶段,患者的神经功能处于初步恢复状态,此时脑机接口技术可以作为一种辅助手段,帮助患者建立大脑与下肢之间的联系。通过引导患者进行运动想象,采集大脑信号并驱动康复设备进行被动运动训练,增强患者的运动意识和感觉反馈。在中期康复阶段,患者的肢体运动能力有所提高,脑机接口技术可以结合主动运动训练,让患者通过大脑信号控制康复设备进行自主运动,逐渐恢复下

肢的运动功能。到了后期康复阶段,脑机接口技术可以用于巩固康复效果,进行功能性训练,如模拟日常生活中的行走、上下楼梯等动作,提高患者的生活自理能力。

4 结语

综上所述,脑机接口技术可以通过对大脑信号的实时监测和分析,帮助患者重新建立大脑与肢体之间的联系,促进神经可塑性的发展,从而实现下肢功能的恢复。随着研究的不断深入,脑机接口技术有望在脑卒中患者下肢功能康复中发挥重要作用,为患者带来更好的康复效果和生活质量。

参考文献

- [1]王雪淞,汪月,徐岩,等.脑机接口联合不同疗法治疗脑卒中患者肢体功能障碍:效果与机制分析[J].中国组织工程研究,2025,29(30):6538-6546.
- [2]刘玉岳.脑机接口技术联合重复经颅磁刺激技术对缺血性脑卒中下肢功能障碍患者的疗效观察[D].青海大学,2024.
- [3]黄佳琪.脑机接口技术对脑卒中恢复期患者下肢运动功能和认知功能的影响[D].湖南中医药大学,2024.
- [4]李冠男.兼有视觉及运动反馈的脑机接口训练对脑卒中偏瘫患者认知、心理、肢体运动及脑功能的长期疗效随机对照研究[D].安徽医科大学,2024.
- [5]李冠男,洪永锋.脑机接口对脑卒中偏瘫患者下肢功能的长期疗效研究[J].现代仪器与医疗,2023,29(06):81-86.
- [6]顿华帅,郭航天,李洪艳,等.基于镜像疗法的脑机接口技术在脑卒中患者上肢功能康复中的应用[J].重庆医学,2023,52(18):2820-2824.
- [7]罗茜.脑机接口对改善缺血性脑卒中急性期偏瘫患者下肢运动功能的效果研究[D].川北医学院,2023.
- [8]张明,王斌,贾凡,等.基于脑电图的脑机接口技术在脑卒中患者上肢运动功能康复中的应用[J].中国组织工程研究,2024,28(04):581-586.
- [9]张瑞萍,姜雪婷,张杨,等.脑机接口康复机器人在脑卒中急性期患者下肢运动功能康复中的应用研究[J].中国实用医药,2021,16(34):196-198.

作者简介:曾维昌,出生年月:(1986-10),性别:男,民族:汉族,本科。